

Аналітичний огляд електронних та електромеханічних систем електромобілів Tesla

Смирнов О.П.¹, Борисенко А.О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Стаття присвячена проблемі створення екологічно чистих транспортних засобів та їх електронних і електромеханічних компонентів. У дослідженні проведений аналітичний огляд передових електромеханічних технологій, що застосовуються при створенні електромобілів Tesla. Проведено аналітичне дослідження системи електронного контролю стійкості, активної пневматичної підвіски та електронідилювача керма. Перспективність розробки електромобілів полягає у тому, що тільки вони задовольняють усім економічним вимогам сучасності та відповідають парадигмі “Zero Emission”. Отримані результати дозволяють створювати рекомендації щодо розробки електронних та електромеханічних систем електромобілів та можуть бути рекомендовані науково-технічним працівникам, які займаються розробкою екологічно чистих транспортних засобів.

Ключові слова: електромобіль; Tesla; електронний блок управління, електронна система контролю стійкості; електронна система розподілення гальмівної сили; активна пневматична підвіска; електронідилювач керма.

Вступ

Світовий ринок електромобілів у світі стрімко зростає. Компанія BloombergNEF прогнозує, що продажі легкових електромобілів буде досягнутий 10 мільйонів у 2025 році, 28 мільйонів у 2030 році і 56 мільйонів до 2040 року. Очікується, що в цей момент електромобілі складуть більшу частину продажів нових автомобілів з прогнозованим 57 % [1]. Тому підтвердження, що електромобіль Tesla Model Y вперше очолив продаж нових автомобілів у Європі у вересні 2022 року [2].

Актуальність даного дослідження полягає у тому, що дозволяє детально проаналізувати та дослідити передові технології, що застосовуються при створенні електронних та електромеханічних систем та комплексів електромобілів Tesla [3].

Сучасні електромобілі позбулися таких недоліків як невисока динаміка та низька максимальна швидкість, обмежена дальність

пробігу та повільна зарядка батареї. Наприклад, електромобіль Tesla Model S Plaid розганяється до 96,5 км/год за 1,99 с, має максимальну швидкість 322 км/год, дальність пробігу 840 км по циклу NEDC [4]. На швидкій зарядці, через з'єднання CCS Supercharger, Tesla може зарядитися за 15 хв на близько 300 км запасу ходу. За словами Ілона Маска (Elon Musk) цей автомобіль «швидше Porsche, безпечніше Volvo» [5].

Аналіз публікацій

На сучасному етапі розвитку науки та техніки проблема створення екологічно чистих та енергозберігаючих транспортних засобів вирішується за рахунок застосування електропривода, який отримує живлення від енергоємних акумуляторних батарей [6].

Широкий розвиток електромобілів відбувається за рахунок використання літій-іонних акумуляторів із покращеною продуктивністю, високим терміном служби та з зменшен-

ням їх вартості [7].

Екологічно чистими є також транспортні засоби на паливних елементах (FCV) [8]. Але через високу вартість та обмежену мережу заправних станцій для таких автомобілів, вони мають невеликий попит. Тому найбільшу популярність на сьогоднішній час отримують класичні електромобілі, електропривод яких отримує живлення від тягової акумуляторної батареї [9].

У роботах [10-12] проведений опис основних концепцій електромобілів, технологічні розробки в тягових акумуляторних батареях, проведений огляд моделювання, оцінки стратегій управління для використання електромобілів.

У роботах [13-18] проведений огляд гібридних систем накопичення енергії для електромобілів, проведений аналіз загальної вартості володіння звичайного, гібридного та електричного автомобіля, проведені дослідження та діагностика електронних та електромеханічних систем та комплексів електромобіля BMW i3, високовольтної акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf, визначена методика та проведений розрахунок енергоємності тягових акумуляторних батарей для електричних транспортних засобів.

Але на сьогоднішній час електромобілі компанії Tesla є найбільш технологічними та перспективними, тому що використовують найсучасніші електронні та електромеханічні системи. Tesla Model S був першим масовим автомобілем, який довів, що електромобілі можуть бути захоплюючими в управлінні, життєздатними як щоденний транспорт і придатними для тривалих подорожей [19, 20].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є аналіз передових технологій, що застосовуються при створенні електронних та електромеханічних систем електромобілів Tesla.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз та дослідження системи електронного контролю стійкості електромобілів Tesla;
- провести аналіз та дослідження активної пневматичної підвіски електромобілів Tesla;
- провести аналіз та дослідження електропідсилювача керма електромобілів Tesla.

Проведено дослідження дозволяє визначити перспективні напрямки розвитку сучасних електронних та електромеханічних систем екологічно чистих транспортних засобів.

Аналіз та дослідження системи електронного контролю стійкості

Система електронного контролю стійкості поєднує в одному модулі всі активні засоби безпеки, які допомагають водію гальмувати, прискорювати автомобіль та проходити повороти.

У комплексну систему електронного контролю стійкості Tesla входять наступні електронні та електромеханічні системи, які виконують відповідні функції:

- антиблокувальна гальмівна система (ABS);
- електронна система розподілення гальмівної сили (EBD);
- система контролю тяги (TCS);
- електронна система контролю курсової стійкості (ESC);
- система допомоги при екстремому гальмуванні (BAS) [21].

Основні датчики та виконавчі пристрої системи електронного контролю стійкості наведені на рис. 1.

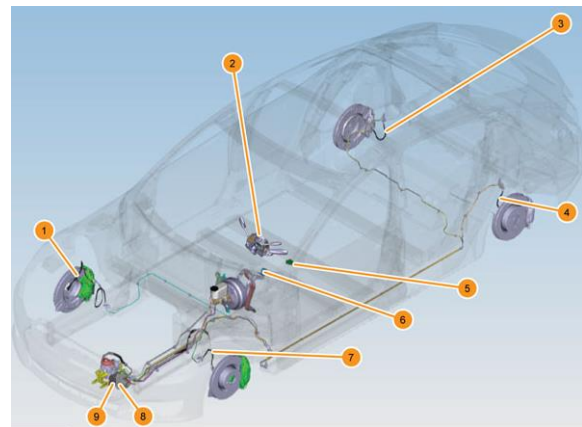


Рис. 1. Основні компоненти системи електронного контролю стійкості ESC: 1, 7 – правий та лівий датчик швидкості руху переднього колеса; 2 – датчик кута управління; 3, 4 – правий та лівий датчик швидкості заднього колеса; 5 – комплекс датчиків швидкості нахилу; 6 – педаль гальм; 8 – гідравлічний блок управління; 9 – електронний блок управління

Електронний блок управління ABS постійно контролює та порівнює сигнали, отри-

мані від датчиків швидкості, розташованих на кожному колесі. Система управління ABS дозволяє водієві досягти максимально можливої сили гальмування, зберігаючи стабільність транспортного засобу з урахуванням будь-якого дорожнього покриття.

Електронна система розподілення гальмівної сили EBD оптимізує розподіл гальмівних сил між передніми та задніми колесами. Система EBD автоматично компенсує зміни в завантаженні автомобіля або дорожніх умовах. Електронна система EBD активна лише під час гальмування та працює над тим, щоб перерозподілити гальмівну силу між передньою та задньою осями до початку дії ABS.

Функції системи контролю тяги TCS запобігають надходженню надмірного крутного моменту до керованих коліс. Контролюючи швидкість обертання коліс, контролер TCS може модулювати та зменшувати крутний момент електричного двигуна, щоб запобігти пробуксовуванню колеса. Система управління тягою Tesla була розроблена спеціально для сприяння плавному керуванню колесом під час максимального прискорення. У випадках, коли одна сторона автомобіля рухається по поверхні з низьким коефіцієнтом зчеплення (наприклад, крижаним льодом), TCS може застосувати гальмо на одному колесі, щоб запобігти його обертання. Це дає змогу виконувати прискорення в умовах, коли одне ведуче колесо має низьке зчеплення з дорожнім покриттям.

Функція електронного контролю курсової стійкості ESC допомагає водію підтримувати оптимальне керування транспортним засобом під час руху на поворотах. Система ESC відрізняється від TCS і ABS тим, що використовує датчики швидкості повороту та прискорення разом з датчиками швидкості коліс. Електронна система контролю курсової стійкості ESC обчислює передбачуваний шлях автомобіля на основі дій водія (від датчика кута управління) і порівнює його з вимірюваною швидкістю повороту транспортного засобу від датчика швидкості повороту. Якщо напрям руху транспортного засобу відхиляється від керуючих дій водія, ESC короткочасно застосовує гальмо на окремих колесах, щоб допомогти повернути транспортний засіб на передбачуваний курс. ESC також контролює та обмежує потужність двигуна настільки, наскільки це необхідно для під-

тримки бічного зчеплення шини під час повороту.

Система ESC працює на всіх дорожніх покриттях та погодних умовах, щоб зберегти стабільний рух транспортного засобу. Однак ESC не може ухилятися від законів фізики і не запобігає втраті керування, якщо водій входить з надмірною швидкістю у крутий поворот. Крім того, ESC лише допомагає транспортному засобу слідувати напрямом, яким керує водій.

Система допомоги при екстремому гальмуванні BAS допомагає водієві під час панічних та надзвичайних ситуацій гальмування. У деяких надзвичайних ситуаціях водій не застосовує достатню силу педалі гальма для досягнення максимального сповільнення автомобіля. Якщо умови, що вказують на надзвичайну ситуацію гальмування, виконуються, BAS використовує насос ESC для підвищення гальмівного тиску, коли гальмівна сила водія недостатня. Тиск гідравлічного гальма збільшується набагато швидше, ніж тиск з боку водія, і підтримується при оптимальному робочому тиску ABS. Якщо зусилля педалі гальма додатково зменшиться водієм, функція BAS скасовується.

Центральним компонентом системи ESC є гідравлічний блок управління. Він складається з трьох основних компонентів:

- електронний блок управління (electronic control unit (ECU)), що містить процесор, електронні схеми та драйвера клапанів;
- блок клапанів містить гідравлічні клапани та акумулятори;
- електричний двигун, який служить для підтримки тиску у системі.

Система електронного контролю стійкості працює в режимі очікування, але самодіагностика контролю несправностей безперервна. Якщо електронний блок управління ECU виявить несправність, то на панелі приладів висвітлюється відповідний індикатор та зберігається діагностичний код несправності.

Аналіз та дослідження активної пневматичної підвіски

Активна пневматична підвіска поєднує автоматизовані переваги з функціями, які виконуються на вимоги водія. Як тільки Tesla прискорюється, пневмопідвіска опускає кузов автомобіля для оптимізації аеродинаміки і збільшення дальності поїздки. Водій може використовувати сенсорний екран, щоб під-

няти або опустити кузов для проїзду по високому снігу або заїзду на бездоріжжя. Система керування «запам'ятовує» по геолокації, де піднімається або опускається підвіска, і кожен наступний раз сама повторює цю дію.

Розташування компонентів активної пневматичної підвіски наведено на рис. 2, а компоненти передньої пневматичної підвіски наведені на рис. 3 [21, 22].

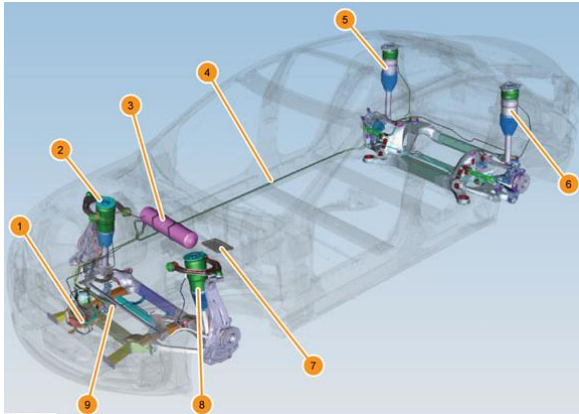


Рис. 2. Розташування компонентів активної пневматичної підвіски: 1 – повітряний компресор; 2, 8 – лівий та правий модуль передньої підвіски; 3 – резервуар; 4 – труби подачі повітря; 5, 6 – правий та лівий модуль задньої підвіски; 7 – електронний блок управління пневматичною підвіскою; 9 – блок електромагнітних клапанів

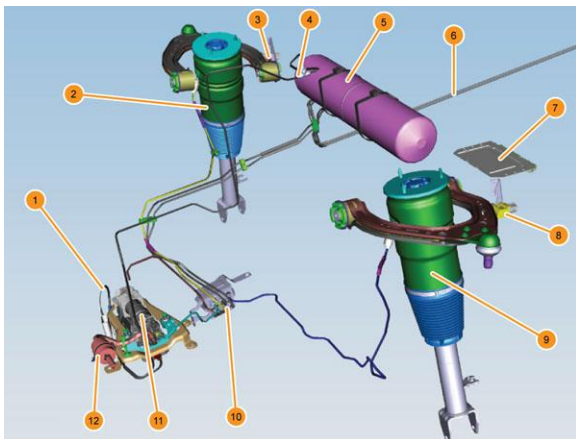


Рис. 3. Компоненти передньої пневматичної підвіски: 1 – датчик температури навколишнього повітря; 2, 9 – правий та лівий модуль передньої підвіски; 3, 8 – правий та лівий датчик висоти передньої висоти; 4 – клапан заповнення системи; 5 – резервуар; 6 – труби подачі повітря; 7 – електронний блок управління пневматичною підвіскою; 10 – блок соленоїдного клапана; 11 – повітряний компресор; 12 – повітряний фільтр

Система підвіски працює від тиску повітря. Повітря пропускається через повітряний фільтр для видалення будь-яких забруднень, а потім всмоктується в систему компресором. Стиснене повітря подається в резервуар, який направляє повітря до модулів передньої і задньої підвіски через блок електромагнітних клапанів і труби подачі повітря, як визначено електронним блоком управління ECU.

Електронний блок управління відстежує рівень висоти транспортного засобу осі автомобіля за допомогою чотирьох датчиків висоти. Блок ECU регулює висоту кузова в залежності від швидкості руху автомобіля, температури навколишнього середовища та від вибору рівня висоти водієм. Такі умови підтримують оптимальний рівень висоти підвіски для різних умов експлуатації.

Електронний блок управління контролює тиск в системі і за необхідністю включає або вимикає повітряний компресор для підтримки правильного тиску. Електронний блок управління ECU вимірює висоту кузова автомобіля шляхом усереднення сигналів висоти з чотирьох датчиків, що розташовані з кожної сторони передньої та задньої осей.

Водій використовує сенсорний екран для вибору відповідного рівня висоти. Сигнал про вибір водія передається у електронний блок управління ECU через шину CAN. Водій може обрати один з чотирьох рівнів висоти пневмопідвіски за допомогою сенсорного екрана: «very high» – дуже високий, «high» – високий, «standart» – стандартний, «low» – низький», як це продемонстровано на рис. 4 [22].

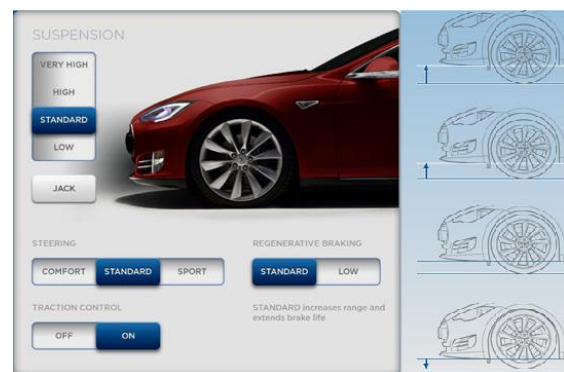


Рис. 4. Встановлення рівнів висоти підвіски на сенсорному екрані

Під час руху автомобіля рівні висоти також можуть змінюватися автоматично, при цьому висота кузова автомобіля зменшується

в залежності від швидкості руху транспортного засобу. Крім того автомобіль, який не рухається автоматично змінює рівень висоти при завантаженні або розвантаженні пасажирів та багажу.

Електронний блок управління активною підвіскою завчасно запрограмований на різні режими роботи для забезпечення сервісного обслуговування. Коли водій вибирає рівень висоти з сенсорного екрану, запитуваний рівень передається у блок управління ECU через шину CAN.

Для управління модулями підвіски та підняття висоти транспортного засобу блок ECU підключає відповідні контакти реле, що включають або відключають компресор. При спрацьовуванні реле підключається електричне живлення до реверсивних соленоїдних клапанів і електромагнітних клапанів в клапанному блоці, щоб спрямувати стиснене повітря з резервуара в пружинні сильфони в підвісних модулях підвіски.

Для управління модулями підвіски та зниження висоти транспортного засобу електронний блок управління подає електричне живлення на реверсивні електромагнітні клапани та електромагнітні клапани в блоці клапанів, дозволяючи компресору перекачувати стиснене повітря з пружинних сильфонів назад до резервуару.

Система управління дозволяє водію обирати рівень висоти підвіски «дуже високий» коли швидкість автомобіля нижче 10 км/год, при цьому підвіска встановлюється на 33 мм вище «стандартного» рівня. Така опція використовується для підняття кузова автомобіля в екстремальних дорожніх умовах та ситуаціях. Як тільки швидкість автомобіля перевищує 16 км/год, підвіска автоматично опускається до рівня «високий».

Система управління дозволяє водію обирати рівень висоти підвіски «високий» коли швидкість автомобіля нижче 32 км/год, при цьому підвіска встановлюється на 23 мм вище «стандартного» рівня. Якщо швидкість транспортного засобу перевищує 32 км/год, підвіска автоматично опускається до рівня «високий».

Рівень висоти підвіски «стандартний» забезпечує оптимальний комфорт та керованість у будь-яких умовах руху автомобіля та його навантаження (додаткові пасажирів, важкий багаж тощо). Така опція гарантує, що транспортний засіб має горизонтальну лінію висоти кузова при високому навантаженні

багажного відділення. При цьому задня частина кузова автомобіля не опускається вниз.

Електронний блок управління підвіскою для покращення аеродинаміки автомобіля автоматично обирає рівень висоти підвіски «низький» коли швидкість автомобіля перевищує 90 км/год протягом 30 с або коли швидкість зростає понад 115 км/год. При цьому підвіска встановлюється на 20 мм нижче «стандартного» рівня.

Аналіз та дослідження електропідсилювача керма

Електропідсилювач керма EPS включає рульове колесо, розбірний вузол рульової колонки, який кріпиться до балки автомобіля, проміжний вал, що складається з верхньої та нижньої ланок, та рульове колесо з електроприводом. Вимикачі для сигналів повороту, круїз-контролю, положення рульової колонки, перемикача передач та механізмів склоомивача розміщуються у вузлі рульової колонки. Збірка рульової колонки та її компоненти наведені на рис. 5.

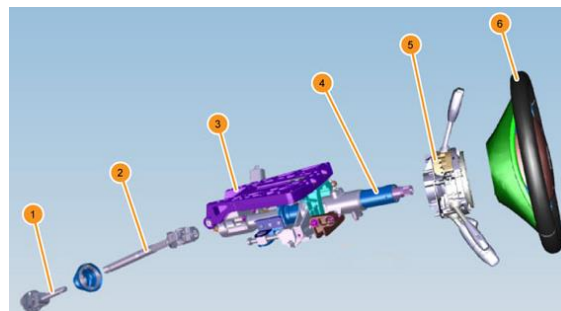


Рис. 5. Збірка рульової колонки: 1 – проміжна ланка – нижня; 2 – проміжна ланка – верхня; 3 – кронштейн; 4 – рульова колонка; 5 – модуль управління рульовою колонкою; 6 – рульове колесо

Електронний блок управління електропідсилювача керма EPS ECU попередньо запрограмований з даними автомобіля та робочими параметрами, за допомогою яких можна обчислити струм приводу двигуна на основі сигналів, що надсилаються датчиком крутного моменту та сигналами даних CAN від інших систем автомобіля.

Схема структурна електронного блоку управління EPS ECU наведено на рис. 6. Двигун рульової колонки – це електронно комутований безщітковий електричний двигун встановлений на рульовий стійки. Двигун розташований паралельно рейковій штанзі і

з'єднаний зі стійкою через привідну гайку та зубчастий гумовий ремінь. Електродвигун рульової колонки приймає струм сигналу від електронного блоку управління EPS ECU і перетворює його в обертовий рух. Обертання двигуна передається на привідну гайку через гумовий ремінь і змінюється на лінійний рух рейкової штанги через ряд кулькових підшипників, розміщених у гвинтовій канавці рейки та приводної гайки. Лінійний рух стійки переноситься на кулькові з'єднання штанги, кермові кронштейни та колеса.



Рис. 6. Схема структурна електронного блоку управління електропідсилювача керма EPS ECU

Струм двигуна та сила на рейковій стійці прямо пропорційні вхідному моменту водія. Електричне рульове управління залежить від швидкості, тому рульове управління отримує більше допомоги на низькій швидкості і менше допомоги на високій швидкості.

Датчик крутного моменту, встановлений на вхідному валу рульової передачі, вимірює крутний момент, який застосовує водій на рульове колесо. Датчик містить резистивні елементи та полюсне колесо з магнітами. Він з'єднаний з рульовим колесом за допомогою торсіонного елемента.

Коли водій повертає рульове колесо, торсіонний елемент повертається, що призводить до зміни опору в елементі датчика крутного моменту. Цю зміну опору отримує електронний блок управління EPS ECU, який аналізує інформацію від інших датчиків транспортного засобу, таких як швидкість, кут повороту рульового колеса тощо. Потім електронний блок управління EPS ECU генерує поточний сигнал для надання оптимальної допомоги для кожної ситуації.

Датчик кута повороту є частиною модуля управління рульовою колонкою. Датчик замикає рульову колонку через пару сповіщу-

вачів, які знаходяться в прорізах у зовнішній втулці рульової колонки, таким чином центруючи модуль на колонці. Датчик кута повороту передає кут повороту керма іншим системам транспортного засобу через швидкісну мережу CAN [22].

Комбінований датчик бічного прискорення і швидкості розташований під центральною консоллю. Датчик використовується для роботи ESC і вимірює обертання транспортного засобу навколо своєї вертикальної осі, одночасно вимірюючи прискорення, яке перпендикулярне напрямку руху. Функція ESC використовує сенсорні входи для виявлення виникнення бічного ковзання під час повороту. Датчик повідомляє блоку управління ESC по мережі CAN.

Електропідсилювач керма EPS має три різних режими: Comfort, Sport та Standard. Режим Comfort забезпечує найбільшу допомогу в рульовому управлінні. Режими Sport надає найменшу допомогу, щоб дати водієві максимальний зворотний зв'язок з рульовим керуванням. Режим Standard забезпечує рівновагу між двома протилежними режимами.

Якщо джерело живлення транспортного засобу виходить з ладу, водій може продовжувати керувати автомобілем через механічне з'єднання між рульовим колесом і колесами. Однак для повороту керма потрібно набагато більше зусиль, ніж зазвичай.

Висновки

Проведений аналіз публікацій свідчить, що на сучасному етапі розвитку науки та техніки проблема створення екологічно чистих та енергозберігаючих транспортних засобів вирішується за рахунок застосування тягового електропривода, який отримує живлення від акумуляторних батарей. Сучасні електромобілі позбулися таких недоліків як невисока динаміка та максимальна швидкість, обмежена дальність пробігу та повільна зарядка батареї. Найбільш технологічними та перспективними на сьогоднішній час є електромобілі компанії Tesla.

Проведений аналіз передових технологій, що застосовуються при створенні електронних та електромеханічних систем електромобілів Tesla показав, що електронна система контролю стійкості (ESC) поєднує в одному модулі всі активні засоби безпеки: антиблокувальна гальмівна система (ABS), електронна система розподілення гальмівної сили

(EBD), система контролю тяги (TCS), електронна система контролю курсової стійкості (ESC), система допомоги при екстремому гальмуванні (BAS). Комплексна робота цих систем підвищує активну безпеку транспортного засобу та сприяє створенню автоматизованого автомобіля.

Активна пневматична підвіска поєднує автоматизовані переваги з функціями, які виконуються на вимогу водія. Наприклад, водій може самостійно обрати один з чотирьох рівнів висоти пневматичної підвіски: «дуже високий», «високий», «стандартний», «низький». Але в залежності від швидкості автомобіля, система керування автоматично обирає рівень висоти підвіски для зниження повітряного опору. Електронний блок управління ECU контролює горизонтальність та висоту кузова автомобіля за допомогою чотирьох датчиків.

Електропідсилювач керма EPS має три різні режими: комфорт, спорт, стандарт, які забезпечують різні рівні допомоги водію. Електронний блок управління електропідсилювача керма EPS ECU аналізує інформацію з датчика крутного моменту рульового колеса, режиму роботи, швидкості, за яким обчислює струм приводу двигуна та генерує поточний сигнал для надання оптимальної допомоги у кожній ситуації окремо.

Подяка

Ця робота проводилась у рамках науково-дослідної роботи «Розробка енергоефективних та високоманеврених багатовісних автомобілів подвійного призначення для Збройних Сил України», державний реєстраційний номер: 0123U101766, а також у рамках науково-технічної роботи «Розроблення дослідного зразка енергоефективного колісного малогабаритного транспортного засобу подвійного використання», державний реєстраційний номер: 0122U200935, що фінансуються Міністерством освіти і науки України

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. EVO Report 2022. BloombergNEF. Bloomberg Finance LP. (б. д.). BloombergNEF. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
2. Tesla's Model Y tops new car registrations in

- Europe in September - report. (2022, 27 жовтня). Reuters. <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/teslas-model-y-tops-new-car-registrations-europe-september-report-2022-10-27/>
3. Model S. (б. д.). Tesla. <https://www.tesla.com/models>
 4. Tesla Model S Plaid breaks all the records in first independent test, but 0-60 mph has a caveat. (б. д.). Electrek. <https://electrek.co/2021/06/17/tesla-model-s-plaid-breaks-records-in-first-independent-test-but-0-60-mph-caveat/>
 5. 2021 Tesla Model S: Costs, Facts, And Figures. (2021, 24 вересня). hotcars.com. <https://www.hotcars.com/2021-tesla-model-s-costs-facts-and-figures/>
 6. Martins, L. S., Guimarães, L. F., Botelho Junior, A. B., Tenório, J. A. S., & Espinosa, D. C. R. (2021). Electric car battery: An overview on global demand, recycling and future approaches towards sustainability. *Journal of Environmental Management*, 295, 113091. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113091>
 7. Ehrenberger, S., Dasgupta, I., Brost, M., Gebhardt, L. & Seiffert, R. (2022). Potentials of Light Electric Vehicles for Climate Protection by Substituting Passenger Car Trips. *World Electric Vehicle Journal*, 13(10):183. <https://doi.org/10.3390/wevj13100183>
 8. Muratori, M., Alexander, Marcus, Arent, Doug, Bazilian, Morgan, Dede, Ercan M., Farrell, John, Gearhart, Chris, Greene, David, Jenn, Alan, Keyser, Matthew, Narumanchi, Sreekant, Pesaran, Ahmad, Sioshansi, Ramteen, Suomalainen, Emilia, Tal, Gil, Walkowicz, Kevin, Ward & Jacob. (2021). The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations. United States. <https://doi:10.1088/2516-1083/abe0ad>
 9. Hardman, S., Shiu, E., & Steinberger-Wilckens, R. (2015). Changing the fate of Fuel Cell Vehicles: Can lessons be learnt from Tesla Motors? *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(4), 1625–1638. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.149>
 10. Ding, N., Prasad, K., & Lie, T. T. (2017). The electric vehicle: a review. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 9(1), 49. <https://doi.org/10.1504/ijehv.2017.082816>
 11. Sharma, S., Panwar, A. K., & Tripathi, M. M. (2020). Storage technologies for electric vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(3), 340–361. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.04.004>
 12. Ravali, G. G., & Raju, K. N. (2021). Technological developments in batteries: a survey of modeling, estimation, and management strategies for EV application. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 13(2), 194. <https://doi.org/10.1504/ijehv.2021.10041359>
 13. Gupta, A., & Kumar, H. (2022). Multi-

- dimensional perspectives on electric vehicles design: A mind map approach. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100483. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100483>
14. Charles, C. M. R., & Savier, J. S. (2022). An overview on hybrid energy storage systems for electric vehicles. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 14(1/2), 56. <https://doi.org/10.1504/ijehv.2022.125248>
 15. Mitropoulos, L. K., Prevedouros, P. D., & Kopolias, P. (2017). Total cost of ownership and externalities of conventional, hybrid and electric vehicle. *Transportation Research Procedia*, 24, 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.117>
 16. Смирнов, О.П., Борисенко, А.О., Марченко А.В., Романенко, А. В., & Євтушенко С. В. (2019). Дослідження та діагностика електричних систем електромобіля BMW і3. *Автомобільний транспорт*, (44), 5-13. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.5>
Smyrnov, O.P., Borysenko, A.O., Marchenko A.V., Romanenko, A. V., & Yevtushenko S. V. (2019). Doslidzhennia ta diahnostryka elektrychnykh system elektromobilia BMW i3. *Avtomobilnyi transport*, (44), 5-13. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.5>. [in Ukrainian]
 17. Смирнов, О.П., Борисенко, А.О., & Марченко А.В., (2019). Розрахунок енергоємності тягових акумуляторних батарей для електричних транспортних засобів. *Автомобільний транспорт*, (45), 31-37. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.45.0.31>
Smyrnov, O.P., Borysenko, A.O., Marchenko A.V., (2019). Rozrakhunok enerhoiemnosti tiahovykh akumuliatornykh batarei dlia elektrychnykh transportnykh zasobiv. *Avtomobilnyi transport*, (45), 31-37. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.45.0.31> [in Ukrainian]
 18. Смирнов, О. П., Борисенко, А. О., & Марченко, А. В. (2019). Діагностика високовольтної акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (16), 19-25. <http://veit.khadi.kharkov.ua/article/view/187283>
Smyrnov, O. P., Borysenko, A. O., & Marchenko, A. V. (2019). Diahnostryka vysokovoltnoi akumuliatornoї batarei elektromobilia Nissan Leaf. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (16), 19-25. <http://veit.khadi.kharkov.ua/article/view/187283> [in Ukrainian]
 19. Tesla Electric Vehicles: Reviews, Pricing, and Specs. (б. д.). *Car and Driver*. <https://www.caranddriver.com/tesla>
 20. Smyrnov O., Borysenko A. Analysis of design features of systems and components of the Tesla Model S electric car. *Automobile transport*. 2022. No. 51. P. 35–42. URL: <https://doi.org/10.30977/at.2219-8342.2022.51.0.04> (date of access: 20.05.2023).
 21. Fix Your Tesla - A directory of shops servicing Teslas and a forum for DIY Tesla owners. (б. д.). Fix Your Tesla - A directory of shops servicing Teslas and a forum for DIY Tesla owners. <http://www.fixyourtesla.com/>
 22. Смирнов О., Какубава Р. Дослідження активної пневматичної підвіски Tesla Model S. *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології»*, ХНАДУ, м. Харків, 23-24 листоп. 2020 р. Харків, 2019. С. 58–60.
Smyrnov O., Kakubava R. Doslidzhennia aktyvnoi pnevmatychnoi pidvisky Tesla Model S. *Materialy VII Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi Internet-konferentsii «Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii»*, KhNADU, m. Kharkiv, 23-24 lystop. 2020 r. Kharkiv, 2019. S. 58–60.
- Смирнов Олег Петрович**¹, д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки, e-mail: smirnovloleg@gmail.com, тел. +38 068-609-94-58, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>
- Борисенко Анна Олегівна**¹, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: anutochka2111@gmail.com, тел. +38 096-110-69-49, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Analytical review of electronic and electromechanical systems of electric vehicles

Abstract. Problem. This article addresses the issue of developing environmentally friendly vehicles and their electronic and electromechanical components. It provides an analytical review of advanced electromechanical technologies utilized in the creation of Tesla electric cars. Specifically, the study analyzes the electronic stability control system, active pneumatic suspension, and electric power steering. The perspective of electric cars lies in their ability to meet the economic requirements of modernity and align with the "Zero Emission" paradigm. The obtained results can serve as recommendations for the development of electronic and electromechanical systems and complexes of electric vehicles, benefiting scientific and technical professionals engaged in the creation of environmentally friendly vehicles. **Goal.** This study aims to analyze the advanced technologies used in the development of electronic and electromechanical systems of Tesla electric cars. **Methodology.** The research employs an analytical study of the

characteristics of the electronic and electromechanical systems of Tesla electric cars to achieve the set goal. It includes a detailed analysis of the electronic stability control system, active pneumatic suspension, and electric power steering. **Results.** An analysis of scientific publications reveals that the problem of creating environmentally friendly and energy-efficient vehicles is currently being solved through the use of electric drives powered by traction batteries. Modern electric cars have overcome drawbacks such as low dynamics, limited range, and low maximum speed, surpassing similar internal combustion engine vehicles in these aspects. Tesla electric cars are currently the most technologically advanced and promising in this field. The analysis focuses on the technical solutions and advanced technologies employed in Tesla Model S electric cars, specifically the electronic stability control system, active pneumatic suspension, and electric power steering. The conducted research allows for an assessment of the current state of electronic and electromechanical systems in electric cars and provides insights into their future development. **Originality.** The results of this research provide a comprehensive understanding of the present state of electronic and electromechanical systems in Tesla electric cars. It enables a detailed analysis and exploration of the advanced technologies used in the development of Tesla

electric cars and their distinctive features. **Practical Value.** The research findings contribute to identifying promising directions for the development of contemporary electronic and electromechanical systems in electric vehicles. They serve as a basis for creating recommendations concerning electronic stability control systems, active pneumatic suspension, and electric power steering, which can be valuable to scientific and technical professionals involved in the development of environmentally friendly vehicles.

Key words: electric car; Tesla; electronic control unit, electronic stability control system; electronic braking force distribution system; active pneumatic suspension; electric power steering

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, smirnovloleg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Borysenko Anna¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-11-06-949, anutochka2111@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.